



TITLE:

<総説>地球環境と木材利用

AUTHOR(S):

井上, 雅文

CITATION:

井上, 雅文. <総説>地球環境と木材利用. 木材研究・資料 1998, 34: 7-21

ISSUE DATE:

1998-12-01

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/51406>

RIGHT:

地球環境と木材利用*

井 上 雅 文**

Wood Utilization and Global environment

Masafumi INOUE

(平成10年9月16日受理)

1. は じ め に

「鉄の家 森林保護うたう」「木への愛着 克服へ」。1998年1月20日の日経新聞夕刊第一面に、木材関係者をドキッとさせるような見出しの記事が掲載された。「地球にやさしい住宅」というタイトルで組まれた特集の第一回目であるが、森林資源を保護するために鉄鋼材料を構造材に使ったスチールハウスを啓蒙しようという内容の記事である。さらに、このためには、「木の温もりにこだわる日本人にどうやって鉄の家をなじませるか（木への愛着をどのように克服させるか）が課題である」とまで書かれている。日本列島は気候に恵まれており、木の種類も豊富であるため、世界的に見ても、日本人はよく木を使う民族である。世界最古、最大、最高の歴史的木造建築が、それぞれ法隆寺、東大寺大仏殿、東寺五重塔であるように、日本人は様々な物を木で造り、巧みな木の使い方によって、独特な「木の文化」を築き上げてきた。短絡的かつ一元的な考え方によって、長年にわたって築き上げた文化を捨てよというのであろうか。スチールハウスの販売促進のための記事であると言えばそれまでだが、日本を代表する新聞紙上で「木材を利用することは環境を破壊することである」と論評されたことは、木材関係者にとって、まことに残念である。

地球温暖化などの地球環境問題に対する意識が加速し始めた1990年頃から、木材利用と地球環境に関する議論が盛んになり、A. H. Buchanan³³⁾の報告を基に、大熊、有馬らを中心として多くの論文³¹⁻⁴³⁾が発表され、ここでは木材利用が環境保全に果たす役割について論じられている。最近では、ライフサイクルアセスメント法によって、製品の環境に与える負荷の程度が厳密に評価され、木材の環境調和材料としての有意性が確認されている⁴⁴⁾。これらの議論は、IPCC レポート(気候変動に関する政府間パネル報告書、1996)⁴⁵⁾や関係官庁から発表される資料にも取り上げられるなど、研究途上ではあるが、かなりの部分が認知されつつある。

しかし、一方、非木質系材料メーカーのホームページなどでは、「……木材の使用を最低限に抑え自然との共生を考えた……」と、誤った認識の基で、環境保護を楯に木材利用が完全否定されている。また、先日、木材関連業界の方に講演した際、「みなさんは木材を商っておられるが、最近話題になっているように環境破壊の一端を担っているようで心苦しくありませんか？」と質問すると、8割程の方が肯かれ

* 第53回木研公開講演会(平成10年5月22日)において講演した。

** 機能性高分子分野

Key words: global environment, green house effect, CO₂, wood processing, wood products

てしまう。このように、世論が、一部業界の利益のために指導されているのが現実である。

ここでは、地球温暖化問題を概説し、環境保全において木材利用の商業ポイントとなりうるトピックスを挙げ、「木材利用≠環境破壊」であり、木材利用が環境保全に果たす積極的な役割について紹介する。

2. 地球環境問題

2.1 地域公害から地球環境

十数年前までは、環境問題といえば、カドミウムの慢性中毒によるイタイイタイ病（1955年）やメチル水銀化合物による水俣病（1956年）などの地域公害が話題の中心であった。地域公害のすべてが解決されたわけではないが、通信、運輸システムが発達した現在、環境問題といえば、地球規模でのそれが一般的な概念となっている。地球環境問題に対する明確な定義、分類はないが、国際的な場では、主に、地球温暖化問題、酸性雨、オゾン層の破壊、森林の破壊、有害物質の越境移動、砂漠化、野生動物の保護、海洋汚染、発展途上国の公害などの9分野について議論されることが多い¹⁾。とりわけ、昨年、COP3（気候変動に関する国際連合枠組条約第3回締約国会議）が京都で開催されたこともあり、地球温暖化に対する意識が急激に加速している。

2.2 温室効果ガス²⁾

地球大気は、窒素ガス（容積比：78.11%）、酸素ガス（20.95%）、アルゴンガス（0.93%）などの準定常成分と水蒸気（0～7%）、二酸化炭素（平均 $3.6 \times 10^{-2}\%$ ）、メタン（ $1.7 \times 10^{-4}\%$ ）、フロン類（ $2.8 \sim 4.8 \times 10^{-8}\%$ ）などの微量な変動成分で構成されている。これらは、太陽からの日射エネルギーに対してほぼ透明であるため、日射は大気層を透過し、地球表面を暖めたり、光合成作用に使われたりする。暖められた地球表面からは、その温度に応じて、赤外線エネルギーが外部へ放射（赤外放射）される。この時、大気中の準定常成分は、赤外線に対してもほぼ透明であるが、熱力学的にアクティブな変動成分は、赤外線エネルギーを吸収し、再びエネルギーを放出する。このような気体が大気中に含まれていると、ち

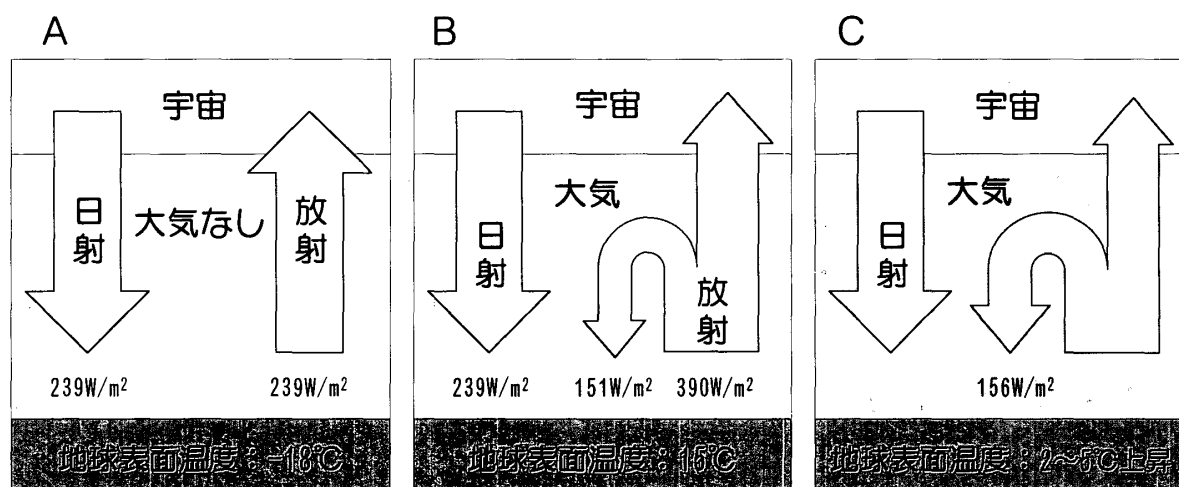
表1 大気の化学組成と温室効果²⁾

	大気中の濃度		1980年代の増加量/年	赤外放射の強さ
	1750～1800年	1992年	()内は増加率/年	(W/m²)
準定常成分				
窒素	—	78.11%	—	0
酸素	—	20.95%	—	0
アルゴン	—	0.93%	—	0
ネオン	—	18.2ppmv	—	0
ヘリウム酸素	—	5.2ppmv	—	0
クリプトン	—	1.1ppmv	—	0
キセノン	—	0.09ppmv	—	0
変動成分				
水蒸気	—	0～3000ppmv	—	～100
二酸化炭素	280ppmv	355ppmv	1.5ppmv(0.4%)	50
メタン	0.70ppmv	1.71ppmv	0.013ppmv(0.8%)	1.7
一酸化二窒素	275ppbv	311ppbv	0.75ppbv(0.25%)	1.3
フロン(CFC-11)	0.0	503pptv	18～20pptv(4%)	0.06
代替フロン(CFC-12)	0.0	105pptv	7～8pptv(7%)	0.12

ようど温室のガラスのように働き、地球からの赤外放射を遮断するので、これらの気体は温室効果ガス（赤外放射活性気体）と呼ばれている。

2.3 温室効果（地球温暖化）のメカニズム²⁻⁵⁾

地球の単位表面積に吸収される日射エネルギーの強さ（流束密度）は、平均 $239\text{W}/\text{m}^2$ である。地球表面の温度が変化しないのであれば、地球表面が吸収したエネルギーは、すべて赤外線エネルギーとして地球表面から宇宙に放出されなければならない。すなわち、地球表面から放出される赤外放射も $239\text{W}/\text{m}^2$ になるはずである（図1-A）。赤外放射で $239\text{W}/\text{m}^2$ のエネルギーを放出する物体の表面温度を計算（ボルツマンの法則）すると -18°C となる。ところが、現在の地球の平均気温は、約 15°C （1961～1990年の平均）と観測されている。表面温度が 15°C の物体から放出される赤外放射の強さは $390\text{W}/\text{m}^2$ であり、これは地球表面が吸収する日射エネルギー量（ $239\text{W}/\text{m}^2$ ）より、 $151\text{W}/\text{m}^2$ も多いことになる（図1-B）。この分が前述の温室効果ガスによる赤外放射の強さと考えられる。すなわち、地球表面を覆う大気中に温室効果ガスが存在しなければ、地球表面の温度は -18°C となり、人類が生存できるような状態ではなくなる。しかし、実際には、温室効果ガスの赤外放射によって、地球表面の温度は、これより 33°C も高い平均 15°C に保たれているのである。



大気のない地球

現CO₂(355ppmv)大気下の地球高CO₂(700ppmv)大気下の地球

図1 地球温暖化のメカニズム(内嶋原図)

温室効果ガスの赤外放射の強さを表1に示す。水蒸気（65%）と二酸化炭素（32%）が温室効果のほとんどを担っていることが分かる。ただし、大気中の水蒸気含量は、気温の変化によって決定されるものであるため、水蒸気は地球気候の変動を引き起こす原因にはならない。これに対し、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、フロン類は、大気中の濃度が上昇すると、大気の恒常的な温室効果を増大させるため、地球の気候変動（地球温暖化）を引き起こす原因となる。例えば、大気中の二酸化炭素濃度が現在の2倍の700ppmvになると、大気の温室効果は増大し、大気から地球表面への赤外放射は、現在よりも約 $5\text{W}/\text{m}^2$ 増加し、これによって地球表面の温度は、 $2\sim5^\circ\text{C}$ 上昇すると試算される（図1-C）。

工業生産活動が活発化するに伴って、石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料の大量燃焼によって二酸化炭素、水田耕作や家畜飼育によってメタンガス、窒素肥料やフロン類の化学合成とその利用によって一酸化二窒素や各種フロンガスなどの温室効果ガスが大気中に大量放出されている。また、森林伐採を

伴う土地利用の変化によって、二酸化炭素の吸収源が著しく減少している。二酸化炭素について言えば、産業革命以前には280ppmvであった濃度が、1994年には約358ppmvにまで上昇した。IPCC レポート(1996)によると、19世紀末から現在までに、地球全体の平均気温は0.3~0.6°C上昇し、これに伴って、海面が10~25cm 上昇したと報告している。温暖化の影響は、実際に現れているのである。

さらに、IPCC による地球温暖化の予測では、図2に示すように、経済成長、人口増加、対策の有無、気候感度(二酸化炭素増加による気温の変化しやすさ)などの条件を想定し、2100年までに地球上の平均気温は1~3.5°C上昇すると予測している。また、気温の上昇は高緯度地域ほど大きく、北極や南極では10°C近く上がるという予測もある³⁾。

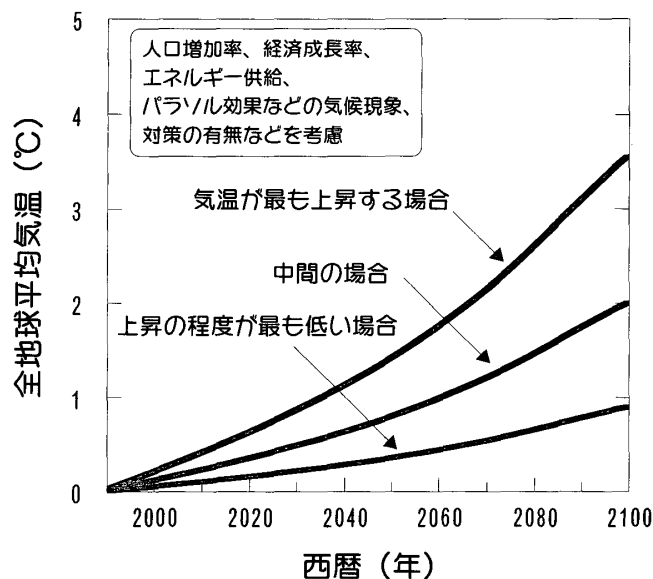


図2 IPCC(気候変動に関する政府間パネル)による地球の平均気温予測

2.4 温暖化による影響²⁻¹¹⁾

地球規模で気温が上昇すると、海水の体積膨張や氷河の融解によって海面が上昇する。IPCC レポートでは、南極氷床の融解はないと仮定し、2100年の海水位上昇をほぼ50cm(30~80cm)と予想している。もし、南極の気温が10°C上がって氷が溶け出すと、世界の海水位は5m 上昇し、さらに、南極の水がすべて融解すると、海水位は80m 上昇するという試算もある³⁾。海水位の上昇により、沿岸地域での海岸浸食、淡水帯水層への塩水の進入、世界の主要都市の水没など、深刻な影響をもたらすことが予想される。標高の低い島国や広いデルタ地帯を持つ国では、国土の消失や台風、高潮の被害が増大し、膨大な環境難民が発生することになる。日本では、温暖化により海水位が1m 上昇すると、海面(満潮水位)以下の地域が2.7倍(2,300km²=国土の0.6%)に拡大し、人口1540万人(15%)、資産109兆円が危険にさらされると予想されている⁴⁾。

現在の速度で温暖化が進行すると、気候帯は1年間に4~5km 北上(水平移動)し、樹木植生の分布が著しく変化することになる。表2にヨーロッパ地方での樹木の分布地域移動速度を示すが、マツやカエデのように種子が風でかなり飛ばされる樹種でも、分布の移動速度は1km/年から最高でも1.5km/年と観察されており、気候帯の移動速度の1/3~1/5にすぎない。すなわち、気候帯の変化に追いつけず絶滅する樹種が増えることになる。特に、中緯度帯の森林に影響が大きいと考えられている¹⁰⁾。このような森林の衰退は、林業の活動と配置に影響するだけでなく、野生生物の生息場所の崩壊、さらに水資源の

表2 最近1.5万年間におけるヨーロッパの樹木分布移動速度²⁾

樹 種	移動速度(m/年)
モミ類	40～300
マツ	1500
トウヒ	80～500
カエデ	500～1000
コナラ	200～300
クリ	200～300
クルミ	400
ブナ	200～300
シナノキ	50～500

涵養にも大きな打撃をもたらすと予想される。

小麦のような穀物類の栽培北限は、平均気温が1℃上昇するだけで、数100kmも北へ移動することになる。この他、大洪水、継続的な干ばつなどの異常気象、森林火災、虫害など、自然災害の規模と回数が急速に増加することによって、食料生産への激しい衝撃が予想される³⁾。

夏期の気温が高くなる頻度と期間が増加すると、熱中症、熱射病などの発生率と死亡率が増加することになる。また、死亡率の高い熱帯熱マラリアや、1998年夏にカンボジアで大流行し多数の死亡者がでたデング熱などの流行危険地域が北上するという調査結果がある⁴⁾。最悪の場合、2100年には、中国北部、韓国、西日本一帯までが流行危険地域に入る可能性がある。

これらの他、温暖化は、光化学オキシダント濃度の増加や水質汚濁など、さまざまな公害の影響を助長することも懸念されている⁴⁾。

3. 地球温暖化対策と森林の機能

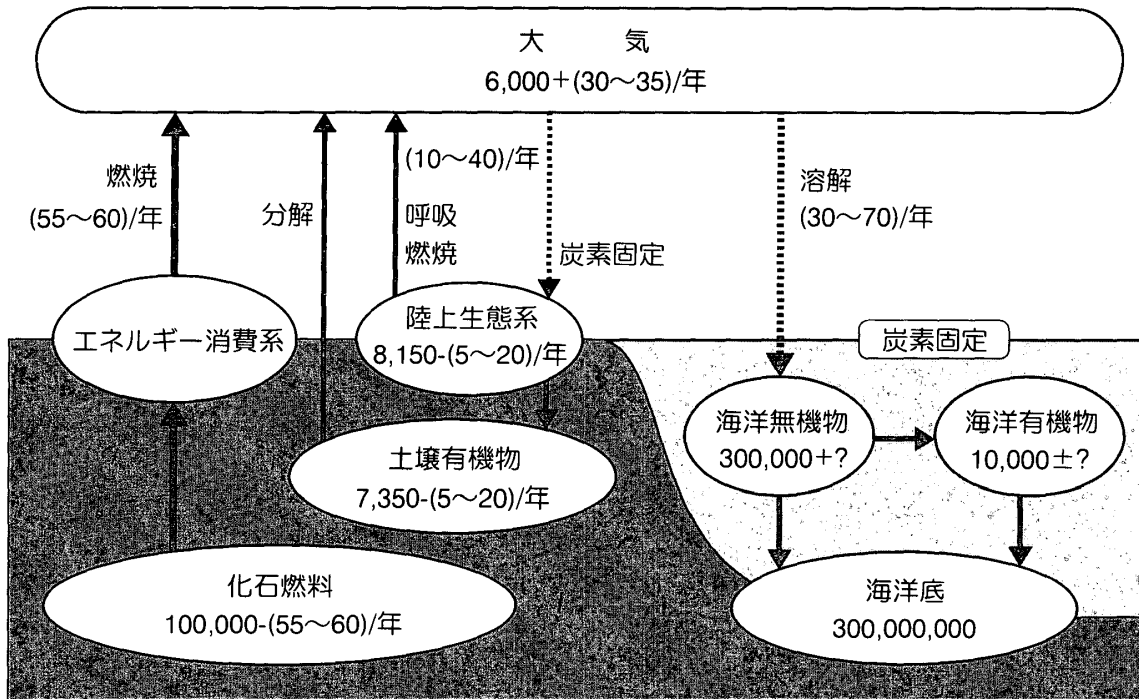
3.1 地球上での炭素循環

地球上の炭素は、大気中、海洋中、地上において、有機物あるいは無機物として存在し、図3に示すように、それぞれの環境が炭素の貯蔵庫としての役割を担っている¹²⁾。地球全体が保有する炭素の量は一定であるので、大気中に気体として存在する炭素（二酸化炭素）の割合が増えることが、地球温暖化の最大の原因となるのである。地球大気中の二酸化炭素濃度が上昇する主な理由として、化石燃料の大量使用（石油換算で約72億トン/年）と森林の大規模伐採（約1540万ヘクタール/年）が挙げられる。そして、大気中の二酸化炭素濃度を安定させ、地球温暖化の進行を阻止するには、発生量の抑制と吸収固定量の増加を図るしかない。発生量の抑制については、エネルギー節約やエネルギー効率の向上などの使用エネルギーの削減と、燃料の転換、代替エネルギーの利用などによる発生量の削減が試みられている。また、後述するが、森林伐採の抑制も二酸化炭素発生量の削減と考えられている。吸収固定量の増加については、炭素蓄積林の育成などによる植物固定量の増加と、化学的手法による人為的固定量の増加について研究が進められている²⁾。

ここでは、発生量抑制と吸収固定量増加の両者に関わる森林の機能について整理してみよう。地球上の炭素循環から見た森林の機能は、①二酸化炭素の吸収固定、②貯蔵の二つに分けられる。

3.2 二酸化炭素吸収体としての森林¹⁴⁻²²⁾

樹木は、二酸化炭素が約1.5kg、水が約300kg、日射エネルギーが約15.7kJあれば、光合成によって、約1kgの炭素化合物（ぶどう糖）を生産することができる。その際、副産物として約1kgの酸素が空气中に放出され、水のほとんどは水蒸気として空气中に放出される¹⁴⁾。ただし、生産された炭素化合物の



(単位：億トン)

図3 地球規模での炭素収支(桑原原図を一部改編)

約半分は、樹木が生命活動を維持するための呼吸によって消費（二酸化炭素として放出）されるので、上記によって固定された二酸化炭素量は約0.75kgと計算され、これが幹、枝、根などになる。いずれにせよ、樹木が生産し、私たちが材料として利用する木材とは、大気中の二酸化炭素が、太陽エネルギーでセルロース、リグニンという形に変化したものである。いわば、“樹木とは二酸化炭素固定装置”であり、“木材とは炭素のかたまり”(炭素：木材の乾燥重量の約50%，酸素：44%，水素：6%)なのである。

樹木が固定する二酸化炭素量は樹木の生長量から計算することができる。例えば、地表部分の直径が50cmで高さが15mのスギが、一年間に5mmの年輪を形成して相似形で成長したとする。樹幹形状を円錐形と仮定して、全乾比重を0.35として計算すると、この樹は、全乾重量で18.5kg肥大成長したことになり、これは、一本のスギが、一年間に37kgの二酸化炭素を吸収したことを意味する¹⁹⁾。

二酸化炭素の吸収能力（成長速度）は、森林生態系やそれを構成する樹種によっても異なり、熱帯多雨林で990、温帯常緑樹林で585、亜寒帯林で360トン/(km²・年)程度である。また、二酸化炭素吸収能力は、林齢によっても異なるが、これについては4.1で述べる。

日本は、国土の約3分の2が森林であり、その面積は約2,500万ヘクタールで、この森林が1年間に固定する炭素の量は約5,400万トンと概算されている。地球全体で考えると、地球上には約50億ヘクタールの森林があり、それが固定する炭素量は、1年間に約328億トンであると推定され、これを二酸化炭素に換算すると、約1203億トンとなる。

3.3 二酸化炭素貯蔵庫としての森林¹⁵⁻²⁵⁾

もう一つの森林の機能は、炭素の貯蔵庫としての役割である。

前述のスギ（地表直径：50cm，高さ：15m，樹幹形状：円錐形，全乾比重：0.35）の樹幹の容積は約1m³であり、このスギの全乾重量は350kgとなる。全乾重量の約半分が炭素なので、この一本のスギにつ

いてみても、175kg もの炭素が貯蔵されていることになる¹⁹⁾。

表3 地球上の森林の炭素収支概算¹⁶⁾

二酸化炭素吸収体としての森林	
光合成による吸収炭素量	: 656億トン/年
呼吸による放出炭素量	: -328億トン/年
実質吸収炭素量	: 328億トン/年
二酸化炭素貯蔵庫としての森林	
植物現存量(乾燥重量)	: 16,500億トン(地球全体の90%)
その貯蔵炭素量	: 7,350億トン(乾燥重量の4/9)
土壌中の貯蔵炭素量	: 7,350億トン(上記とほぼ等量)
貯蔵炭素量合計	: 14,700億トン(大気中の炭素の約2倍、化石炭素の約1/7)
二酸化炭素放出源としての森林	
分解による放出炭素量	: -328億トン/年
伐採、燃焼などによる放出炭素量	: -30億トン/年(化石燃料起源の約1/2)

表4 代表的森林の貯蔵炭素量(トン/ha)²⁰⁾

	植物内	森林土壌内
熱帯多雨林	225	135
熱帯季節林	173	89
温帯常緑林	176	129
温帯落葉林	151	146
北方針葉樹林	100	311
合計	825	810

全地球上の森林についてみると、表4に示すように、植物現存量は、地球全体の植物量の約90%である約1兆6500億トンと推定されている。これを炭素換算すると、森林植物が貯蔵する炭素の量は約7350億トンと計算される¹⁵⁾。さらに、森林土壌には、枯死体としての有機炭素が多量に含まれている。この量は、表3に示すように、気候や森林の種類によって大きく異なる²⁰⁾。気温が低い亜寒帯では、枯死体の分解が遅いため土壌中の貯蔵量が多く、現存量の約1.5倍である。一方、分解の早い熱帯では、貯蔵量が少なく、現存量の0.5倍ほどである(表4)。地球上全体では、植物内と土壌に含まれる炭素量は、

ほぼ同じであると考えられるので、森林全体に貯蔵されている炭素の合計は、1兆4700億トンと概算できる。これは、石油や石炭として地下に埋蔵されている炭素量の約1/7、大気中に二酸化炭素として保有されている炭素量(約7200億トン)の約2倍に当たる¹⁵⁾。もし、地球上の森林の半分以上を燃やせば、即座に大気中の二酸化炭素濃度は2倍になるのである。

3.4 森林伐採が放出する二酸化炭素

現在の森林面積の消失速度は、1540万ヘクタール/年と推定されている。これは1分間に約30ヘクタールもの森林が消失している計算になる¹⁵⁾。伐採されても、すぐに炭素が放出されるわけではないが、いずれは燃えるか分解されることによって、植物中あるいは森林土壌中に貯蔵されていた炭素は、二酸化炭素として大気中に放出される。森林破壊によって、大気中に放出される炭素量は、平均的な熱帯林の植物現存量から推定すれば、年間約30億トンと概算される。これは、化石燃料の燃焼による炭素放出量(約60億トン/年)の約半分に当たる膨大な量である。少なくとも現状の森林消失は、膨大な量の二酸化炭素を大気中に放出している。また、最近では、森林破壊による森林土壌からのメタンガスの大量放出も指摘されている²⁾。

森林を伐採するということは、炭素吸収源を減少させるばかりでなく、時間的な遅れはあるが、結果的には、蓄積されていた炭素を燃焼、腐朽によって大気中に放出することになる。このことだけを見れば、

ば、森林伐採は、地球環境に対し、二重の罪を犯すことになる。ここで、木材利用＝森林伐採＝環境破壊という短絡的な考えが成立し、非木質系業界は、これを楯に木材利用を否定しているのである。また、彼らの誤った認識に基づく誇大広告によって、木材関連業者を含め、一般消費者もこの短絡的な図式に肯いているようである。

表5 熱帯諸国における1980年代の森林破壊の要因²⁸⁾

要 因	ブラジル	インドネシア	カメルーン	全世界
林業	2	9	0	6
農業	91	90	100	90
移動農業	15	59	79	45
牧場	40	0	0	24
定住農業	4	3	3	3
他	32	28	18	18
工業	7	1	0	4
探鉱	2	0	0	1
発電施設	2	0	0	1
他	2	1	0	2

(単位：%)

3.5 森林伐採の理由²⁸⁻²⁹⁾

確かに、木材を利用しようとするならば樹木を伐採しなければならない。しかし、1540万ヘクタールもの森林が消失しているのは用材利用のためだけではない。実は、毎年、消失している1540万ヘクタールの森林のほとんどは、農地化や都市化による土地利用の改変なのである。統計的には、用材伐出のために伐採される森林は、ほんのわずかである。表5に、熱帯諸国における1980年代の森林破壊の要因を示すが、熱帯雨林の破壊と林業との相関は極めて低いことが分かる。全世界では、森林破壊の90%が農業に、4%は他の工業に起因し、林業によるものはわずかに6%である¹⁶⁾。1980年代、日本は、東南アジア諸国における森林破壊の元凶であるかように非難されたが、インドネシアについて見ても、用材伐出のための森林伐採は1割に満たない²⁸⁾。

森林破壊の中で、地球の炭素循環に最も悪影響を与えているのは、熱帯域の農地化であると考えられている。農業目的で伐採される森林の約半分は移動農業、いわゆる焼き畑農業による森林の農地化である。農地開発では、伐採された樹木は、その場で焼かれるため、貯蔵されていた炭素はすぐに二酸化炭素に戻る。また、開発された農地は、数年で生産力が低下し、その後は放棄されることになる。

さらに、もう一つ注目しておくべきことは、世界の木材使用量の内、約54% (18.7億 m³/年、1992年) が燃料用として利用されていることである。その割合は、熱帯域の国々で特に高く、インド91%、フィリピン91%、インドネシア79%、ブラジル71%と、高い割合で、森林が燃料用として消失している¹⁶⁾。

わずかな量であっても、無秩序に使っても良いということではないが、地球環境に多大な影響を与えている熱帯雨林などの森林消失のすべてが木材生産のためだけではないことを承知いただきたい。環境保護のための森林保護であるならば、他に考えるべきことの方が大きいようである。

次に、木材利用が地球環境保全に果たす積極的な役割について紹介しよう。

4. 地球環境に貢献する木材利用³¹⁻⁴³⁾

4.1 森林も若い頃の方がよく育つ

樹木が光合成によって生産した有機物の総量を総生産というが、その一部は、樹木自体の生命維持の

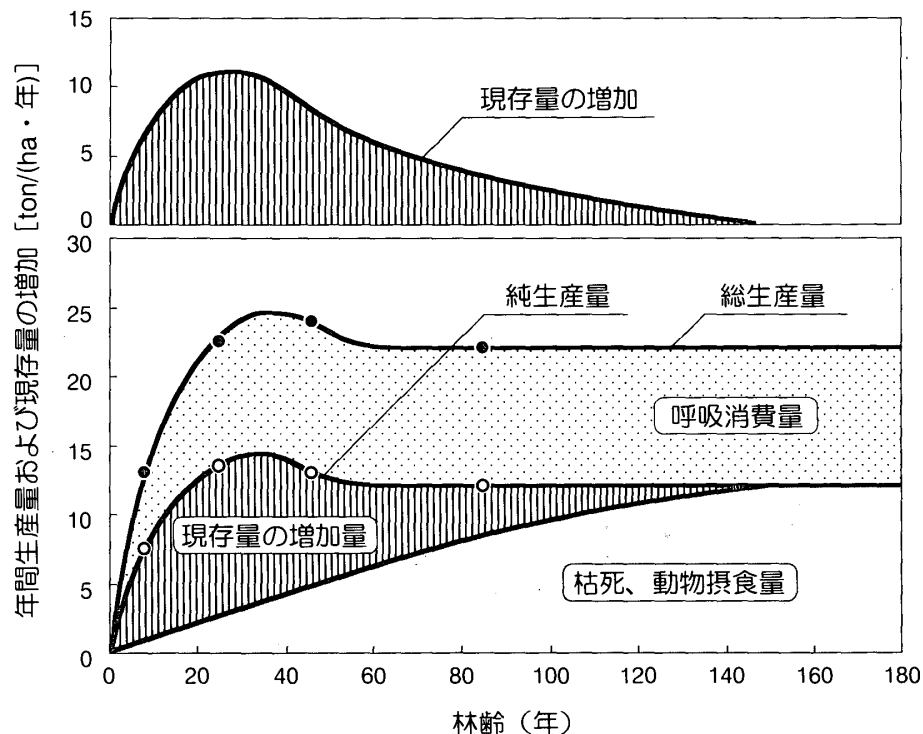


図4 森林の物質生産量と各部位への分配
(大畠らの解釈を基に, Moller, C. M.らのデータを再プロット)

ために、呼吸として消費される。残った有機物が、樹体の形成、翌年の成長のための蓄積物となり、これが純生産と呼ばれる。さらに、純生産の一部は、樹体の枯死（落葉落枝、根の枯死、幹の枯損）や動物の摂食によって消費されるので、これらを差し引いた分が現存量として森林内に蓄積される²⁰⁾。図4に、森林の物質生産量と各部分への分配を示す。本図は、ヨーロッパブナ林で測定されたデータ (Moller, C. M., 1954) を、大畠ら^{23, 25)}の解釈に従いプロットし直したものである。若い森林では、総生産量、純生産量は林齢とともに増加する。しかし、30年以降になると、生産の担い手である葉量が最大となるため、両者ともに最大値をとる。熱帯における早生造林樹種では、およそ10年目で純生産が最大となることが報告されている²⁶⁾。日本の森林においても、物質生産の最大点が比較的若い森林(10～30年)で現れることが確認されている^{21, 24)}。純生産量は、最大値をとった後、若干降伏するが、その後は平衡となり、ほぼ同量で増え続ける。しかし、生産された物質がすべて蓄積されるわけではない。若い森林であっても、純生産の一部は枯死や動物摂食によって消費されるが、純生産量が枯死量を上回るので、現存量(蓄積量)は次第に増加する。林齢が経過すると、枯死量が増加し、純生産は林木の枯死を埋め合わせ、回復させるだけになる。これに従って、現存量の増加は小さくなり、現存量は上限に達しやがて一定となる。すなわち、純生産が維持しても、現存量の増加はなくなるのである²³⁾。

このような森林では、人間が樹木を伐採して木材を利用しない限り、生産された物質のほとんどが枯死量となり、動物や菌類の生産、分解に利用されることになる。この段階の森林では、固定する二酸化炭素と放出する二酸化炭素の量の収支がゼロになる。すなわち、成熟した森林では実質的な二酸化炭素吸収能力はなくなるのである。

従って、樹木はある程度成長すると計画的に伐採し、材料として木材を利用し、その代わりに若い苗木を植える方が、結果として炭素の吸収固定量が多くなるのである。計画的な木材利用は、森林を破壊

するものではなく、むしろ、地球上の炭素循環においては、環境保全にプラスの効果がある。伐採された樹木も、木材として利用されている間は、製品中に炭素が保管(4.3参照)されていることを考慮すると、「成長した樹木は伐って木材として使う。すなわち木材製品として炭素を保管する。そして伐った後に必ず新しい苗木を植える。」ことが、積極的に大気中の二酸化炭素を減少させることになるのである³⁵⁾。

だからといって、天然林から大径の木材をいくらかでも伐採しても良いと言うわけではない。二酸化炭素を固定し、木材を提供するだけが森林の機能ではない。森林には、水資源、土資源、生物多様性などの保全、防災、水質、汚染物質の浄化などの様々な機能がある。人工造林であっても、これらの機能を担っているのであるから、自然の恵みである木材を利用する場合、これらのことを忘れてはいけない。

4.2 炭素放出量の少ない木材加工

高度に発達した社会生活を営む上で、私たちはさまざまな物を作る。また、そのための材料が必要となる。家を建てるにしても、机や窓枠を作るにしても、必ずそのための材料が必要となる。そして、これらの材料を調製するために火力や電力などのエネルギーが消費される。エネルギーの大半は化石燃料の燃焼によって得られるが、その際、大量の二酸化炭素が大気中に放出される。石油換算で50MJのエネルギーを消費する毎に、約1kgの炭素が放出される計算になる³⁴⁾。電力としてエネルギーを利用するのであれば、火力発電の熱効率が3割程度なので、化石燃料に換算すると約3倍の燃焼エネルギーが必要になり、その分の炭素が大気中に放出される。これらを基に、各種材料製造時に消費されるエネルギーと放出炭素量が、A. H. Buchanan らによって試算されている³³⁾(表6)。1m³の木材を製造するために、天然乾燥では、約15kgの炭素を放出するが、人工乾燥すると加熱のためのエネルギーが必要となるため約2倍の炭素が放出される。合板では、単板切削、乾燥、加熱圧縮などの行程が増え、接着剤も必要となるので、120kg(素材の約8倍)もの炭素が放出されることになる。パーティクルボードも200kgと意外に多くの炭素が放出される。一方、鋼材やアルミニウムでは、それぞれ5300kg、22000kgと桁違いに多いことが分かる。ただし、鋼材やアルミニウムでも、リサイクルによって製造される場合、これらの試算より炭素放出量は少なくなると考えられる。

表6 各種材料製造時における消費エネルギーと炭素放出量

	消費エネルギー		炭素放出量		製品中の炭素貯蔵量 (kg/m ³)(炭素含有率)	±放出炭素量 (kg/m ³)
	(MJ/kg)	(kg/m ³)	(MJ/トン)	(kg/m ³)		
天然乾燥製材(比重:0.50)	1.5	750	30	15	250(50%)	-235
人工乾燥製材(0.50)	2.8	1,390	56	28	250(50%)	-235
防腐処理木材(0.50)	3.1	1,540	62	31	250(50%)	-219
合板(0.55)	12	6,000	218	120	248(45%)	-128
パーティクルボード(0.65)	20	10,000	308	200	260(40%)	-60
鋼材(7.6)	35	266,000	700	5,320	0(0%)	5,320
アルミニウム(2.53)	435	1,100,000	8,700	22,000	0(0%)	22,000
コンクリート(2.40)	2.0	4,800	50	120	0(0%)	120

これらの材料を用いて、延べ床面積が136m²の平均的な住宅を建築する場合の主要構成材料の炭素放出量を比較すると、木造住宅では、一戸あたり5140kgの炭素を放出するのに対し、鉄筋コンクリート造住宅では21814kg(木造の4.24倍)、鉄骨プレハブ造住宅では14,743kg(木造の2.87倍)もの炭素を放出することになる³⁶⁾。木造住宅が、いかに地球に優しい住宅であるかが分かる。

さらに、工業生産の過程では、エネルギー消費によって放出される二酸化炭素以外にも、地球環境に

において負荷となる物質が放出される。北村ら⁴⁴⁾は、木材 (Pine)、プラスチック (HDPE)、鉄鋼 (Steel) の3種類の素材を用いて、50kNの引張力に耐えうる長さ1mの柱材を製造することを想定し、その際に排出される環境負荷物質とその排出量をLCA手法を用いて計算している。その結果を表7に示すが、鉄鋼、プラスチックに比べ、木材加工において、各環境負荷の原因物質の排出が極めて少ないことが読みとれる。

いずれにせよ、「環境保護のため、木材の使用を最低限に抑え……」などの広告文句には、疑問を感じざるをえない。

表7 50kNの引張力を持つ柱材を製造する際に排出される環境負荷原因物質とその排出量⁴⁴⁾

	単位・代表物質	木 材	プラスチック	鉄 鋼
密度	kg/m ³	530	960	7800
引張強さ	N/mm ²	56	33	500
必要断面積	m ²	893/10 ⁻⁶	1515×10 ⁻⁶	100×10 ⁻⁶
柱の重量	kg	0.47	1.45	0.78
温暖化	kg・CO ₂	1.97×10 ⁻¹	2.46	0.814
オゾン層破壊	kg・CFC11	1.68×10 ⁻³	0.0	8.9×10 ⁻⁹
酸性化	kg・SO ₂	2.11×10 ⁻³	6.57×10 ⁻³	3.96×10 ⁻³
富栄養化	kg・PO ₄	1.15×10 ⁻⁴	5.65×10 ⁻⁴	2.42×10 ⁻⁴
重金属	kg・Pb	5.34×10 ⁻⁷	0.0	4.18×10 ⁻⁷
発ガン性	kg・B(a)P	3.76×10 ⁻⁸	1.66×10 ⁻¹⁰	4.60×10 ⁻⁷
煤塵	kg・SPM	1.57×10 ⁻³	3.80×10 ⁻³	3.57×10 ⁻³
光化学スモッグ	kg・C ₂ H ₄	1.45×10 ⁻⁴	5.43×10 ⁻³	9.32×10 ⁻³
固形廃棄物	kg・Solid	1.34×10 ⁻¹	0.0	0.533

4.3 炭素を貯蔵する木材製品

アルミニウムや鉄などの材料は、製造時に大量の炭素を放出するだけでなく、できあがった製品の中に炭素をまったく含んでいない。それに対し、木材は、製造時の炭素放出量が少ないばかりでなく、木材として存在する期間、すなわち、燃えたり、腐ったりするまでの間は、固体として固定された炭素を保管し続ける。いわば、木造住宅や木材製品は、炭素の保管庫としての役割を担っているのである。表6中に、各種材料で製造された製品中の炭素貯蔵量を示す。アルミニウムは、製造時に22000kg/m³の炭素を放出するが、製品中には全く炭素が含まれていないため、アルミニウム利用による炭素放出は、正味22000kg/m³となる。一方、木材の場合、天然乾燥材についてみれば、製造時に15kg/m³の炭素を放出するが、製品中には250kg/m³の炭素が貯蔵されているため、正味-235kg/m³の炭素放出と考えることができる。「樹が伐られた後には、また樹が植えられ、生育する過程で二酸化炭素を吸収する」と仮定すれば、木材利用はマイナスの炭素放出なのである。

地球上の炭素循環における森林の機能は、炭素の吸収源と貯蔵であるが、成熟した森林については、もはや炭素の吸収能力がなく、貯蔵庫としての働きしか果たさない。樹木は、伐採されると同時に炭素を吸収固定する能力を失うが、木材として利用されている間は、貯蔵庫としての働きを維持する。従って、木造住宅や木製品は、成熟した森林と同じ機能を持つことになる。これらの観点から、有馬は、木造住宅群を「都市の森林」と位置づけ、木材製品の環境保全に対する有意性を評価している。

岡崎ら³⁶⁾の試算によると、1993年の我が国の全住宅に使用されている木材量から計算される炭素貯蔵量は約1億4000万トンであり、これは、我が国の全森林に貯蔵されている炭素量(7億8000万トン)の約18%にも及ぶ。木造住宅と非木造住宅が貯蔵する炭素量は、それぞれ43kg/m²、8.7kg/m²であるた

め、我が国の全住宅が貯蔵する炭素量の内訳は、木造住宅が1億2859万トン、非木造住宅が1234万トンとなる。木造住宅が全体の9割以上を担っていることになり、炭素貯蔵庫としての木造住宅の価値が評価される。

木材製品中に貯蔵されている炭素も、使用期間が終了すると、やがては消却（焼却、分解）され、同時に二酸化炭素を放出する。しかし、木材を消却する量が森林の生長量を上回らなければ、大気中の二酸化炭素の量は、木材の利用によって積極的に減少させることができる。他の建築材料は、使用すれば必ず大気中の二酸化炭素を増加させるのに対し、木材資源は使用しながら大気中の二酸化炭素を減らす可能性を持つ唯一の資源なのである。

4.4 材料変換による地球環境への貢献

近年の金属加工や石油化学の発達に伴って、従来、木製であった部材の多くが、他の工業製品に代替されている。木造住宅であっても、アルミサッシやその他多くのプラスチック製品が使われている。サッシについて比較すると、表8に示すように、木製サッシ (2.8kg/m^2) 製造時の炭素放出量は、アルミサッシ (97kg/m^2) のその約35分の1であり、それだけ地球環境に与える負荷が少ないと言える。さらに、木製サッシ中には炭素が貯蔵 (5.6kg/m^2) されているが、アルミサッシ中には炭素が全く貯蔵されていない。これを加味すると、アルミサッシを木製で代替することによって、窓枠1平方メートルあたり約100kgもの炭素放出を減少できることになる。従って、プラスチックや金属製によって代替された部材を、再び木材製品に置き換えることができれば、炭素放出量を減少することができる。また、これに伴い、廃棄物も減少することが可能となるだろう。

表8 アルミサッシと木製サッシの製造エネルギーと炭素放出量³⁵⁾

	アルミサッシ	木製サッシ
サッシ全重量(kg)	11.2	11.2
単位製造エネルギー(MJ/kg)	435	3.1
全製造エネルギー(MJ)	4832	35.7
炭素放出量(kg)	97	2.8
製品中の炭素貯蔵量(kg)	0	5.6
±放出炭素量(kg)	97	-2.8
炭素放出量の差(kg)	99.8	
木材代替による炭素放出量の軽減(kg/kg)	8.9	

現在、木材製品が利用されている部材においても、さらに他材料によって置き換えられようとしている。例えば、材料の信頼性とコストによって、一部の工業化住宅では、床組仕様が木製から鋼製へと替えられつつある。床面積が127m²のモデル住宅を例に試算すると、木製床組では、土台、大引き、根太などがあわせて1.01m³の防腐処理木材が使用されている。これが鋼製に置き換えられると、0.04m³の鋼材が使用されることになる。表6のデータを利用して一戸あたりの炭素放出量を計算すると、木製仕様が31kg、鋼製仕様が213kgとなる。木製仕様の場合、炭素貯蔵量が一戸あたり253kgと計算されるので、正味の炭素放出量は-222kgとなり、鋼製との差は435kgと計算される。一戸の住宅が木製から鋼製に代替されるだけで、435kgもの炭素が余分に放出されることになる。これを全着工件数に換算すると一年間に41万トンもの炭素が現在よりも多く放出される計算になる。これは、我が国に約10万台の乗用車が増えたことに等しく、IPCC予測に基づく地球温暖化への貢献度0.01%に相当する。

表9 1棟あたりの床組製造時の製造エネルギーと炭素放出量(1階床面積127m²)

	鋼鉄仕様	木製仕用
床組全材積(m ³)	0.04	1.01
単位製造エネルギー(MJ/m ³)	266,000	1,540
全製造エネルギー(MJ)	10,640	1,555
炭素放出量(kg)	213	31
炭素貯蔵量(kg)	0	253
正味炭素放出量(kg)	213	-222
炭素放出量の差	435kg	
二酸化炭素換算	1595kg	
床面積あたり二酸化炭素放出量	12.6kg	
全着工件数に換算(1997年)	41万トン	

4.5 持続可能な木質資源

石油、石炭、鉄鉱石などの埋蔵資源は、掘り出して使ってしまうと、いつかは底をつく。ところが、木質資源(木材、竹材)は、伐採して使っても、その後に新しい苗木を植えておけば、30~50年で、また材料やエネルギー源として使えるように成長してくれる。使う木材の量が成長する樹木の量を越えない限り、すなわち、一度伐採した樹木(木材)をリサイクルを繰り返し、樹木の生長期間利用することができれば、木材は、永久に持続可能な資源として利用できるのである。これに関し、大熊³⁷⁾は、木材の生産と利用過程における炭素ストックの変化について、興味深いモデルを提供しているので図5に紹介する。

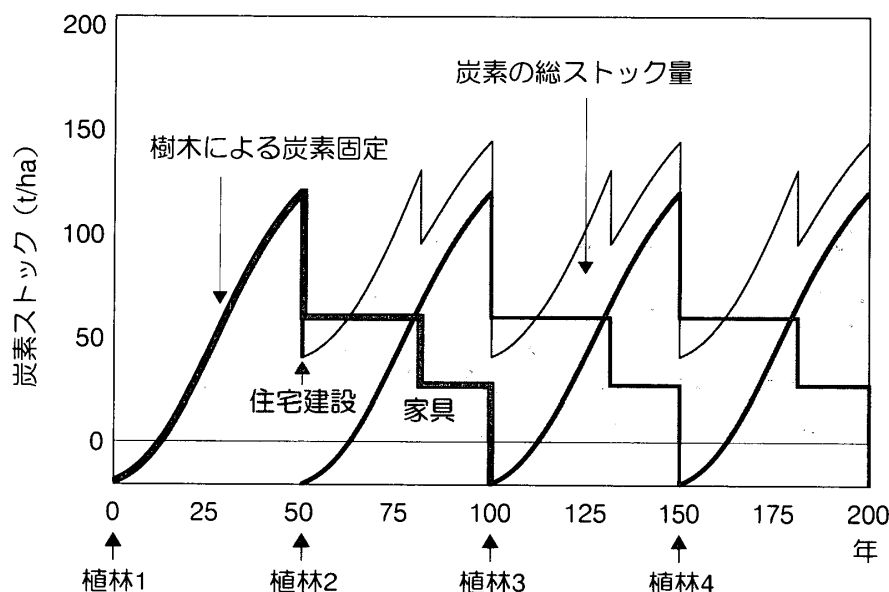


図5 造林伐期50年、住宅使用33年、家具使用を17年とした場合の炭素ストックの持続性(大熊原図を一部改編)

林地に植林された樹木は、大気中の二酸化炭素を吸収固定して現存量を増加(成長)していく。ただ

し、植林時にもエネルギーが必要なので、炭素ストックはマイナスから始まる。一定期間経過後、成長した造林木は伐採され、木材として住宅などの部材に利用される。この時、歩留まりによって一部が廃棄され、これらは焼却、分解されるので、一部の炭素が放出される。また、伐採、輸送、製材、その他の加工に要するエネルギー消費によって炭素が放出されるため、炭素ストックは減少する。しかし、木材製品中には、炭素がストックされたままの状態である。何年か後に、この住宅は解体される。解体材の一部はチップ化されてパーティクルボードなどの木質材料に再加工され、家具などにリサイクル利用される。この時にも、一部の廃棄とエネルギー消費によって炭素は放出されるが、家具材としてさらに炭素をストックすることになる。一定期間使用後、これらは解体され廃棄されるが、この時点で、樹木が生育期間中に蓄積した炭素はすべて大気中に戻ることになる。第1回目の伐採と同時に第2回目の植林を行えば、この樹木の生長による炭素ストックと住宅や家具材としてストックされる分を合わせた総炭素ストックは極めて高いレベルを保つことができる。このモデルは、樹木の生長期間を50年、木材が完全に廃棄されるまでの期間を50年としているので、長期的に見た炭素ストック量は一定である。しかし、樹木の生長期間が短縮されるか、木材製品の高耐久化技術、リサイクル技術によって製品の使用期間が長期化することにより、大気中の二酸化炭素の量を減少させることができる。すなわち、木材の加工エネルギーと消却量が森林の生長量を上回らないように工夫すれば、木材利用の促進によって、積極的に地球温暖化を防止することができるのである。

4. お わ り に

木材は、持続的に再生産が可能な資源であり、他材料に比べ、加工に要するエネルギーが少なく、それに伴って排出される二酸化炭素の量も少ない。また、その他の環境負荷原因物質の排出も極めて少ない。さらに、木材製品中には大量の炭素が保管されており、廃棄する段階においてもバイオマス燃料として利用することが可能である。以上の観点から、森林の炭素吸収機能、炭素貯蔵機能を損なわない範囲であれば、積極的に木材を利用することこそが地球環境保全の切り札となることが確認された。

我々、木材に関わる者にとっては、樹木の伐採が環境破壊につながるという短絡的な考えを持つ方々に対し、これらのことを辛抱強く説得する必要がある。また、木材の用途拡大、利用促進のため、高機能性木質系材料の開発においても、一層の努力が求められているのであろう。

参考・引用文献

- 1) 鈴木英夫：「地球環境を考える」(渡辺 正編)，p. 61，丸善 (1996)。
- 2) 内嶋善兵衛：「地球温暖化とその影響—生態系・農業・人間社会—」，常華房 (1997)。
- 3) 福岡克也：「地球環境保全戦略」，有斐閣 (1995)。
- 4) 環境庁：EIC ネットホームページ，www. eic. or. jp (1998)。
- 5) ワーキング・グループ：大気汚染の現状と温暖化，化学工学，54 (1)，8-12 (1990)。
- 6) 山本良一：「地球を救うエコマテリアル革命」，徳間書店 (1995)。
- 7) 山本良一：「地球にやさしい材料革命，エコマテリアルのすべて」，日本実業出版 (1994)。
- 8) 田中紀夫：CO₂問題の対応策，化学工学，54 (1)，26-29 (1990)。
- 9) ワーキング・グループ：CO₂を減らす技術，化学工学，54 (1)，30-43 (1990)。
- 10) 今木清康：「地球環境科学」，コロナ社 (1996)。
- 11) 月尾嘉男：「サステナブル社会への道筋」，東洋経済新報社 (1996)。
- 12) 桑原正章：「もくざいと環境」(桑原正章編)，海青社，p. 12 (1994)。
- 13) 高橋 徹，鈴木正治，中尾哲也編：「木材科学講座 5 環境」，海青社 (1995)。
- 14) 伊藤弘二：今後のプレカットの工場経営と性能規定について，ウッドミック，No. 185，38 (1998)。
- 15) 只木良也：「森林環境科学」，朝倉書店 (1996)。
- 16) 只木良也：「環境資源としての森林」，「地球環境科学」(樽谷 修編)，朝倉書店，95-100 (1995)。
- 17) 森川 靖：森林の様々な機能，AFF，29 (3)，18 (1998)。

- 18) 渡邊定元：森林と地球温暖化，AFF, **28** (12), **16** (1997).
- 19) 馬場啓一：「もくざいと環境」(桑原正章編)，海青社 (1994).
- 20) R. H. ホイタッカー (宝月欣二訳)：「生態学概説—生物群集と生態系— (第2版)」培風館 (1997).
- 21) 新田義孝：省エネルギーによるグローバルな CO₂排出削減と緑化による CO₂吸収の推定，燃料協会誌, **68** (10), 867-876 (1989).
- 22) アレキサンダー・メイサー (熊崎 実訳)：「世界の森林資源」，築地書館 (1992).
- 23) 大畠誠一：「森林生態学」(岩坪五郎編)，文永堂出版, 84-104 (1996).
- 24) 吉良竜夫：「陸上生態系，生態学講座 2」，共立出版 (1976).
- 25) Moller, C. M. et al：Graphic presentation of dry matter production of European beech, Det. Forstl. Forsogsv., **21**, 327-335 (1954).
- 26) 角張嘉孝：「森林科学論」(木平勇吉編)，朝倉書店, 30-46 (1994).
- 27) 小林繁男：森林生態系におけるエネルギー・物質の流れ，「森林サイエンスの現状と今後の展望，21世紀へのアプローチ」(森林サイエンス研究会編)，全国林業改良普及協会, 42-43 (1994).
- 28) 奥山 剛：アマゾンの熱帯雨林の現状，持続性木質資源工業技術研究会第11回研究会講演要旨集, p. 11 (1998).
- 29) 森川 靖：「熱帯林の減少」(環境庁地球環境部監修)，中央法規出版, 19-24 (1996).
- 30) 大石真人：「森林破壊と地球環境」，丸善, 28-37 (1995).
- 31) 有馬孝礼：エコマテリアル論，木材への視点①，Architecture Today, **1**, 32-39 (1996).
- 32) 有馬孝礼：エコマテリアル論，木材への視点②，Architecture Today, **2**, 35-41 (1996).
- 33) A. H. Buchanan：Timber Engineering and the Greenhouse Effect, Proceeding of 1990 International Timber Engineering Conference, 931-937 (1990).
- 34) 中島史郎，大熊幹章：地球温暖化防止行動としての木材利用の促進，木材工業, **46** (3), 127 (1991).
- 35) 有馬孝礼：「エコマテリアルとしての木材」，全日本建築士会 (1994).
- 36) 岡崎泰男，大熊幹章：炭素ストック，CO₂放出の観点から見た木造住宅建設の評価，木材工業, **53**(4), 161-165(1998).
- 37) 大熊幹章：炭素ストック，CO₂収支の観点から見た木材利用の評価，木材工業, **46** (3), 54-59 (1998).
- 38) 有馬孝礼：資源・環境保全から見た木造住宅の展開，木材工業, **49** (11), 498-504 (1992).
- 39) 有馬孝礼：エンジニアリングウッドの現況と今後の展開，木材工業, **47** (11), 496-503 (1992).
- 40) 有馬孝礼：木質資源のリサイクルとその利用システム，システム農学, **8** (1), 69-80 (1992).
- 41) 有馬孝礼：木造住宅のライフサイクルと環境保全，木材工業, **46** (12), 635-640 (1991).
- 42) 有馬孝礼：エコロジーと建築材料, **13** (8), 13-18 (1993).
- 43) 有馬孝礼：エコマテリアルとしての木材，材料, **43**, 127-136 (1996).
- 44) 北村寿宏，柴田 清，片山裕之：「環境への影響度」を定量化する方法の現状と課題，木材工業, **53**(7), 300-306(1998).
- 45) 井出光俊：京都会議と森林セクターの取り扱いについて，木材工業, **53** (5) (1998).